

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

PCT
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<p>(51) Internationale Patentklassifikation 5 : B24B 1/04, 33/02, 33/08</p>	A1	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 92/07687</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 14. Mai 1992 (14.05.92)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP91/02064</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 31. Oktober 1991 (31.10.91)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: PCT/EP90/01822 31. Oktober 1990 (31.10.90) WO (34) <i>Länder für die die regionale oder internationale Anmeldung eingereicht worden ist:</i> AT usw.</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): KOPP, Volker, Oswald [DE/DE]; Weinbergweg 51, D-7440 Nürtingen (DE).</p> <p>(71)(72) Anmelder und Erfinder: KOPP, Oswald [DE/DE]; Weinbergstraße 51, D-7440 Nürtingen (DE).</p>		
<p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): FLORES, Gerhard [DE/DE]; Gartenstr. 39, D-7302 Ostfildern 3 (DE).</p> <p>(74) Anwalt: DREISS, Uwe; Dreiss, Hosenhuth & Fuhlendorf, Gerokstraße 6, D-7000 Stuttgart 1 (DE).</p> <p>(81) Bestimmungsstaaten: AT (europäisches Patent), BE (europäisches Patent), CH (europäisches Patent), DE (europäisches Patent), DK (europäisches Patent), ES (europäisches Patent), FR (europäisches Patent), GB (europäisches Patent), GR (europäisches Patent), IT (europäisches Patent), JP, LU (europäisches Patent), NL (europäisches Patent), SE (europäisches Patent), US.</p> <p>Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i></p>		

(54) Title: **PROCESS FOR MACHINING THE INNER SURFACES OF BORES**

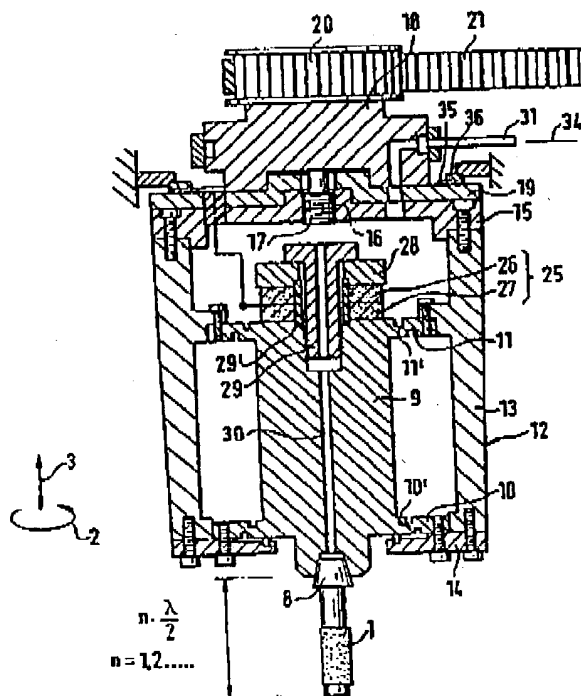
(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUM BEARBEITEN DER INNENFLÄCHEN VON BOHRUNGEN**

(57) Abstract

According to a process for machining bores of workpieces, a honing tool provided with an abrasive coating and radially pressed against the wall of the bore carries out simultaneous rotary and reciprocal movements. In addition to the reciprocal and rotary movements (2, 3), the honing tool (1, 100) vibrates with a high-frequency, short-hub natural vibration (31, 22) excited by ultrasonic oscillation in the range between 16 and 40 KHz.

(57) Zusammenfassung

Beschrieben wird ein Verfahren zum Bearbeiten von Bohrungen in Werkstücken, bei dem ein mit einem Schleifmittelbelag belegtes und radial an die Wandung der Bohrung angelegtes Honwerkzeug gleichzeitig eine Drehbewegung und eine Hubbewegung ausführt. Zusätzlich zu der Hub- und der Drehbewegung (2, 3) führt das Honwerkzeug (1, 100) eine hochfrequente kurzhubige Eigenschwingung (31, 32) aus, die durch die Ultraschallschwingung im Bereich von 16-40 KHz angeregt ist.



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Code, die zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfhügen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	ES	Spanien	ML	Mali
AU	Australien	FI	Finnland	MN	Mongolei
BB	Barbados	FR	Frankreich	MR	Mauritanken
BE	Belgien	GA	Gabon	MW	Malawi
BF	Burkina Faso	GB	Vereinigtes Königreich	NL	Niederlande
BG	Bulgarien	GN	Guinea	NO	Norwegen
BJ	Benin	GR	Griechenland	PL	Polen
BR	Brasilien	HU	Ungarn	RO	Rumänien
CA	Canada	IT	Italien	SD	Sudan
CF	Zentrale Afrikanische Republik	JP	Japan	SE	Schweden
CG	Kongo	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SN	Senegal
CH	Schweiz	KR	Republik Korea	SU*	Sowjet Union
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	TD	Tschad
CM	Kamerun	LK	Sri Lanka	TG	Togo
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	US	Vereinigte Staaten von Amerika
DE	Deutschland	MC	Monaco		
DK	Dänemark	MG	Madagaskar		

+ Die Bestimmung der "SU" hat Wirkung in der Russischen Föderation. Es ist noch nicht bekannt, ob solche Bestimmungen in anderen Staaten der ehemaligen Sowjetunion Wirkung haben.

Titel: Verfahren zum Bearbeiten der Innenflächen von Bohrungen

BESCHREIBUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bearbeiten der Innenflächen von Bohrungen in Werkstücken, bei dem ein mit Schleifmittelbelag belegtes Werkzeug gleichzeitig eine Drehbewegung, eine axiale Hubbewegung und das ferner eine den genannten Bewegungen überlagerte Oszillation ausführt.

Eine derartige Vorrichtung ist aus der Veröffentlichung "Frequenz-Honen für hohe Abtragraten" aus der Zeitschrift Werkstatt und Betrieb 118 (1985 (7), Seite 393-395 (vgl. insbesondere Seite 394, Ziff. 4.1) bekannt. Dort wird der aus Drehbewegung und axialer Hubbewegung gebildeten

WO 92/07687

2

PCT/EP91/02064

schraubenlinienförmigen Grundbewegung des Honvorgangs eine oszillierende Relativbewegung überlagert. Dadurch wird eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit (beim Vorwärtshub) und ein Selbstschärfen der Honsteine (beim Rückwärtshub) erreicht. Die Erzeugung der Oszillation erfolgt durch zwei Hydraulikzylinder. Daraus läßt sich, obwohl in der genannten Druckschrift genauere Angaben nicht gemacht worden sind, schließen, daß es sich bei dieser dritten Bewegungskomponente um eine Bewegung mit einer Frequenz von höchstens einigen 100 Hz handelt. Die Honsteine werden dabei hydromechanisch mit konstantem Druck angepreßt.

Aus der US-Patentschrift 29 39 250 ist ein als "Resonanzhonen" bezeichnetes Verfahren bekannt geworden, das mit einem Honwerkzeug arbeitet, dessen mit Schneidmittelbelag belegte Honleisten dadurch in radialer Richtung verstellbar sind, daß ihre schrägen Zustellflächen mit entsprechend schrägen Zustellflächen einer Zustellstange zusammenwirken. Die Zustellstange wird nun durch eine sie umgebende Spule einem oszillierenden elektromagnetischen Feld ausgesetzt, das als Folge einer Magnetostriktion zu entsprechenden periodischen Verkürzungen bzw. Verlängerungen der Zustellstange führt. Daraus ergeben sich über den genannten Verstellmechanismus entsprechende radiale Hin- und Herbewegungen der Honleisten. Ein zweites Ausführungsbeispiel, das in derselben Druckschrift beschrieben ist, erzeugt eine Schwingung zwischen der inneren Oberfläche der Bohrung und den Steinen des

Schleifmittelbelages des Werkzeuges dadurch, daß die Plattform, auf der das Werkstück befestigt ist, in eine schnelle Auf- und Abwärtsbewegung versetzt wird. Zu diesem Zweck ist die Plattform mit einer Schwingungserregervorrichtung versehen, die eine mit einer elektromagnetischen Oszillation erregte Spule aufweist. Bei beiden Varianten der US-PS 29 39 250 soll diese Oszillation soll zum Zusammenbrechen stumpf gewordener Schleifkörner und damit zur Selbstaufschärfung des Schneidbelages führen. Angaben zur Frequenz werden nicht gemacht; aufgrund der mechanischen Gegebenheiten läßt sich aber vermuten, daß sie auch in diesem Fall bei einigen 100 Hz liegt. Für höhere Frequenzen wäre der gezeigte Verstellmechanismus (Fig. 2) bzw. der Plattform mit Werkstück (Fig. 3) zu träge.

In der US-Patentschrift 29 39 251 ist, ebenfalls mit dem Ziel des ständigen Selbstschärfens des Schneidbelages, ein Verfahren beschrieben, bei dem dem Werkstück (vgl. Figur 2) oder dem Werkzeug (vgl. Figur 9) eine dritte Schwingung erteilt wird, die im Bereich von 20-100 000 Hz, vorzugsweise oberhalb des hörbaren Bereiches liegt, um störende Geräusche für die Umgebung zu vermeiden. Es handelt sich aber auch dabei um elektromagnetisch erregte Schwingungen, die mit Hilfe Spulen erzeugt werden, die den Werkzeug- bzw. Werkstückhalter entsprechend hin und her bewegen. Der Werkzeug- bzw. Werkstückhalter gerät aber nicht in Eigenschwingung, sondern wirkt als starres Mittel der Schwingungsübertragung vom Schwingungserreger zum Werkzeug bzw. zum Werkstück.

WO 92/07687

PCT/EP91/02064

4

Bei dem sog. Superfinishen (auch: Außenhonen) im Durchlaufverfahren wird den rotationssymmetrischen Werkstücken eine Drehbewegung erteilt, während auf der Außenfläche ein Honstein aufsitzt, dem eine hochfrequente Schwingbewegung parallel zur Drehachse des Werkstückes erteilt wird (DE 35 33 082 A1). Die Schwingungen, die dabei eingesetzt werden, haben in aller Regel Frequenzen von bis zu 3000 Schwingungen pro Minute, d.h. von bis zu 50 Hz. Zur Verbesserung des Werkstückabtrags hat man bei dem Verfahren nach der genannten Druckschrift versucht, schrittweise vorzugehen und zwischen den einzelnen Schritten, jeweils nach einem bestimmten erzwungenen Zustellweg, den Superfinishstein ausfeuern lassen.

Im Zusammenhang mit dem Superfinishen, d.h. der Bearbeitung der Außenflächen von rotationssymmetrischen Werkstücken, hat man auch bereits versucht, Ultraschallwellen zur Reinigung der Honsteine einzusetzen (vgl. DE-AS 24 35 848). Dabei wird die Ultraschallschwingung jedoch nicht dem Werkzeug aufgezwungen, sondern vielmehr über das Medium Spülmittel-Flüssigkeit in die Fläche zwischen Werkzeug und Werkstück eingestrahlt, um die Loslösung und das Ausspülen stumpfer bzw. abgebrochener Körner zu fördern.

Das sog. "Ultraschall-Erodieren" betrifft technologisch nicht die Bearbeitung der Innenflächen von Bohrungen, sondern vielmehr das Einbringen von Bohrungen überhaupt mittels ultraschallerregter Bearbeitungsköpfe. Man hat dieses

Verfahren auch bereits mit Bohrmaschinen kombiniert (vgl. US-Psen 3 614 484 und 4 828 052). Damit gelingt es, Bohrungen in Materialien einzubringen, die für das normale Bohren zu hart sind. Es handelt sich dabei aber nicht um das Nacharbeiten der Innenflächen bereits vorhandener Bohrungen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das Verfahren der eingangs genannten Art weiterhin zu verbessern, und zwar einerseits derart, daß ein stärkerer Materialabtrag erreichbar ist, zum anderen auch dahingehend, daß bessere Formkorrekturen möglich sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß durch Ultraschall eine eigenfrequente Oszillation des Werkzeuges im Bereich von 16-40 KHz angeregt wird und daß die freie Länge des Werkzeuges ab Einspannstelle des Schwingungserregers ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge der eigenfrequenten Oszillation des Werkzeuges ist.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen definiert.

Bei der Erfindung zeigt es sich nun überraschenderweise nicht nur ein im Vergleich zum Stand der Technik erhöhter Materialabtrag, sondern daß damit auch bessere Formkorrekturen der Bohrung möglich sind. Ferner entsteht auch eine "neue" durch eine Vielzahl kleiner Taschen gekennzeichnete

WO 92/07687

6

PCT/EP91/02064

Oberfläche. Diese Taschen (vgl. Figur 10) dienen zur Aufnahme von Schmiermittel. Das ist insbesondere bei der Erzielung einer ansonsten extremen Genauigkeit und Formgüte der Oberfläche zur Sicherung der Schmierung im Zusammenwirken mit anderen Bauteilen von großer Bedeutung, insbesondere z.B. wenn es sich um die Innenflächen der Zylinderbohrungen von Automobilmotoren oder um Steuerbohrungen von Ventilen handelt. Es wird also im Prinzip eine neue Oberfläche und ein Verfahren zu deren Herstellung angegeben.

Das neue Verfahren ermöglicht insbesondere hohe Bearbeitungszugaben bei verhältnismäßig feinen Korngrößen mit feinen Bearbeitungsflächen. Mit den erreichbaren Oberflächengüten werden die bisherigen Qualitätsgrenzen des konventionellen Honens überschritten. Bisher galten Werte um $0,6 \mu\text{m } R_z$ als Grenze für gehärteten Stahl. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren konnte diese Oberflächenqualität deutlich verbessert werden. Das Hochfrequenzhonen gemäß der Erfindung ergibt relativ geringe Bearbeitungskräfte. Die Folge davon ist eine lediglich äußerst geringe Gratbildung. Es entsteht eine neue Oberflächenstruktur mit besonders hohem Traganteil. Entsprechend der Kinematik entsteht ein periodisches Oberflächenmuster mit regelmäßigen "Mulden" oder "Taschen", die, wie erwähnt, sich zur Aufnahme von Schmiermittel besonders eignen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung und ihrer vorteilhaften

Weiterbildungen wird im folgenden unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen näher beschrieben. Es stellen dar:

- Figur 1 ein Schema zur Erläuterung;
- Figur 2 ein Steuerschema für die Bearbeitung einer Bohrung mit dem erfindungsgemäßen Verfahren;
- Figur 3 den Schwingungsverlauf eines Schleifmittelkorns an der Wand einer Bohrung;
- Figur 4 ein Schema zur Erläuterung der Kornüberdeckung;
- Figur 5 eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 6 ein erstes Ausführungsbeispiel eines Honwerkzeugs zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 7 die Kontur des Schleifmittelbelags 40 im Werkzeug 1 nach Figur 6;
- Figur 8 ein zweites Ausführungsbeispiel eines Honwerkzeugs zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

WO 92/07687

PCT/EP91/02064

8

- Figur 9 eine schematische Darstellung der elastischen Verformung der Kontur und der Länge des Werkzeugs 1 bei Durchführung der Eigenschwingung;
- Figur 10 eine Oberflächenaufnahme einer mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bearbeiteten Bohrung;
- Figur 11 ein Schema zur Erläuterung der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erreichbaren Honzugaben;
- Figur 12 eine zeichnerische Darstellung zur Zuordnung der Form des Werkzeuges 8 zur Lage der radialen Schwingung und Schwingung in Längsrichtung der Eigenschwingung;
- Figur 13 eine Abwandlung von Figur 9 derart, daß bei maximaler Amplitude der radialen Komponente der eigenfrequenten Schwingung des Werkzeuges 1 eine zylindrische Form des Werkzeuges entsteht.

Figur 1 zeigt ein Honwerkzeug 1. Die übliche Honbewegung, die das Kreuzschliffbild ergibt, ist die Summe einer Drehbewegung (entsprechend Pfeil 2) und einer periodischen Hin- und

Herbewegung (Hubbewegung). Gemäß der Erfindung wird diesen beiden Bewegungskomponenten eine dritte Bewegung, nämlich eine kurzhubige Ultraschall-Oszillation des Werkzeugs überlagert, die zu einer Eigenschwingung des Werkzeugs im Eigenresonanzbereich führt. Die Anregung durch einen Schwingungserreger erfolgt in axialer Richtung also parallel zur Hubbewegung 3. Diese eigenresonante Schwingung des Werkzeugs führt zu elastischen Verformungen desselben und damit zu Bewegungen der einzelnen Bereiche des Werkzeugs sowohl in axialer als auch in radialer Richtung, wie durch die Pfeile 32 und 33 angedeutet. Die Oszillation erfolgt in einem Ausführungsbeispiel mit einer Frequenz von 21,7 KHz einer Amplitude, die bis auf maximal 15 μm eingestellt werden konnte.

Das Werkstück 4 weist eine Bohrung 5 auf, deren Innenfläche bearbeitet werden soll. Das Honwerkzeug 1 ist - wie an sich bekannt - als Dornhonwerkzeug ausgebildet und mit einer konischen Schneidzone 6 versehen, deren hinterer größerer Durchmesser D_1 etwas größer ist als der kleinste Durchmesser der mit dem Honwerkzeug 1 noch nicht bearbeiteten Bohrung 5. Der vordere kleinere Durchmesser D_2 erlaubt die Einführung des Werkzeuges 1. Mit dem Hub in Richtung des Pfeils fährt die konische Schneidzone 6 in die Bohrung 5 ein und arbeitet das Material ab, das einem Bohrungsdurchmesser von weniger als D_1 entspricht. Im Anschluß an die konische Schneidzone 6 ist das Honwerkzeug 1 zylindrisch ausgebildet, so daß es damit in die

WO 92/07687

10

PCT/EP91/02064

Bohrung eingeführt wird. Die Bearbeitung erfolgt vorzugsweise mit einem axialen Doppelhub.

Bei zusätzlicher Anregung des Honwerkzeuges 1 mit einer hochfrequenten kurzhubigen Ultraschallschwingung in axialer Richtung ergibt sich die unerwartete Wirkung, daß sehr viel mehr Material abgetragen werden kann und somit stärker als seither Formfehler der Bohrung berichtigt werden können. Es ergibt sich ferner eine neue Art von Oberfläche, die durch eine Vielzahl von kleinen taschenartigen Vertiefungen gekennzeichnet ist. Diese Oberfläche ist in Fig. 9 als Fotografie gezeigt.

Figur 2 zeigt das Steuerungsdiagramm der Hubbewegung 3 bei (a), der Drehbewegung 2 bei (b) und der Ultraschallanregung bei (c) in ihrer zeitlichen Zuordnung zueinander und in Abhängigkeit von der Zeit. Die breitere Linie bei (c) deutet die Amplitude der Ultraschall-Schwingung an. Die Verweildauer dt bei (a) ist einstellbar. Ebenso sind die Punkte A, B, C, D einstellbar, d.h. jeweils Beginn und Anfang der Drehbewegung und der hochfrequenten Schwingung. Eine Maschine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens unter Berücksichtigung des Steuerdiagramms nach Figur 2 wurde versuchsweise mit folgenden Daten ausgelegt:

Hublänge:	400 mm
Hubantrieb	0,4 kW
Hubgeschwindigkeit:	kleiner als 650 mm/min
Drehantrieb:	0,4 kW
Drehzahl:	kleiner als 5 000 1/Umdrehungen
Verweilzeit am Bohrungsgrund:	kleiner als 10 s
Amplitude:	max. 15 μ m
Frequenz:	20 - 24 kHz
Schall-Leistung des Generators:	bis 2,4 kW

Die Bewegungsbahn einer Spitze eines Schleifmittelkorns 7 in Abhängigkeit von der Zeit ist in einem Bereich von 0 bis 300 μ sec in Figur 2 dargestellt. Die obere und die untere Begrenzungslinie, die je eine steigende Bahn darstellen, entsprechen dem Schrägverlauf der Riefen beim konventionellen Honen.

Stellt man sich vor, daß entlang dieser hochfrequenten Schwingungsbahn die einzelnen Schleifmittelkörner 7 mit einer bestimmten Fläche auf der zu bearbeitenden Oberfläche aufliegen, so ergibt sich je nach dem, wie die Dauer einer Schwingung (Schwingungsperiode) und ihre Amplitude auf die Umfangsgeschwindigkeit des Honwerkzeugs 1 abgestimmt ist, eine der beiden Situationen, die in Figur 4 dargestellt sind. Bei (a), also bei im Verhältnis zur aufliegenden Fläche der Schneidmittelkörner 7 relativ "engen" Schwingung, ergibt sich, daß ein Schleifmittelkorn 7 bei einem ersten Ultraschallhub eine bestimmte Fläche überstreicht, die teilweise bei dem nächsten in entgegengesetzter Richtung stattfindenden Ultraschallhub ebenfalls wieder überstrichen wird. Das heißt: Dieselbe Fläche wird je nach Wahl dieser Parameter praktisch mehrfach bearbeitet, so daß es zu einem "Ausfeuer"-Effekt

WO 92/07687

12

PCT/EP91/02064

kommt. Durch andere Wahl dieser Parameter, wie bei (b), kann man erreichen, daß dieser Effekt auf Bereiche in Nähe der Schwingungsspitzen begrenzt wird. Im allgemeinen ist die Wahl der Parameter, so daß sich der Verlauf nach (a) ergibt, vorteilhafter.

Figur 5 zeigt eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Das auf die Maße D_1 und D_2 und Kontur überschlifene Honwerkzeug 1 ist mit seinem Werkzeugaufnahmekonus 8 in einer konischen Aufnahmeöffnung 8' des Schallübertragungskörpers 9 aufgenommen. Der Schallübertragungskörper 9 weist zwei Flansche 10, 11 auf, die an den Stellen 10', 11' in der dargestellt abgesetzten Art mit Nuten versehen sind, so daß Dünnstellen 10', 11' entstehen, die die Wirkung einer gelenkigen Aufhängung haben, so daß sich eine axiale hochfrequente Ultraschall-Schwingung, die der Schallübertragungskörper 9 ausführt, nicht auf das Gehäuse 12 überträgt. Der Schallübertragungskörper 9 ist z.B. aus Titan. Das Gehäuse 12 besteht aus dem zylindrischen Teil 13, dem unteren Deckel 14 und dem oberen Deckel 15. Der obere Deckel 15 weist in der Mitte eine mit einem Innengewinde versehene Bohrung 16 auf, in die der Gewindezapfen 17 hineinragt, der mit der Aufnahmenabe 18 fest verbunden ist. Gehäusedeckel 15 und Aufnahmenabe 18 sind also miteinander fest verschraubt, wobei die Scheibe 19 dazwischen geklemmt ist. Auf diese Weise

dreht sich das Gehäuse 12 mit der Aufnahmenabe 18 mit, die ihrerseits über Zahnriemenrad 20 und Zahnriemen 21 in Drehrichtung angetrieben wird. Die gesamte Einheit, wie sie in Figur 5 dargestellt ist, einschließlich eines (nicht gezeigten) Motors ist zur Erzeugung der Hubbewegung auf und ab verschiebbar, wie das an sich von üblichen Honmaschinen bekannt ist, so daß auf eine nähere Beschreibung der konstruktiven Details im vorliegenden Zusammenhang verzichtet werden kann.

Der eigentliche Ultraschallschwingungserreger 25, der im Ausführungsbeispiel durch zwei piezoelektrische Elemente (Schwingquarze) 26 und 27 gebildet wird, sitzt auf der Oberseite des Schallübertragungskörpers 9, wobei oberhalb des Ultraschallschwingungserregers 25 noch zur Abstimmung des Schwingsystems eine eine Schwingmasse darstellende Scheibe 28 angeordnet ist. Die gesamte Anordnung ist durch die Spannschraube 29, die im Schallübertragungskörper 9 verschraubt ist, fest verspannt. Die Zentrierung erfolgt mittels Zentrierhülse 29'. Durch den Schallübertragungskörper 9 und die Spannschraube 29 geht ein Kühlmittelkanal 30 hindurch. Dem Innenraum des Gehäuses kann die Leitung 31 und die Öffnungen in der Scheibe 19 und im Deckel 15 ein Kühlmedium zugeführt werden.

Die Zufuhr elektrischer Energie zu dem Ultraschallschwingungserreger 25 erfolgt in der dargestellten

WO 92/07687

14

PCT/EP91/02064

Weise durch am Deckel 15 angeordnete Schleifringe 35 und an einem nicht mitdrehenden Teil der genannten Einheit angebrachte Schleifringe 36. Figur 6 zeigt die einfachste Form eines Honwerkzeuges 1 als Festdorn mit festen nicht einstellbaren Außenabmessungen. Der Schneidbelag hat dabei die Kontur 40, wie sie im einzelnen in Figur 7 dargestellt ist, nämlich etwa über weniger als 10% seiner Länge eine Einführungszone 37, daran anschließend die bereits erwähnte Schneidzone 6, die sich etwa über etwas weniger als die Hälfte der gesamten Länge des Schneidmittelbelages erstreckt, so wie sich daran anschließend die zylindrische Führungszone 38.

Die übliche radiale Aufweitung, wie sie zur Nachstellung von Honwerkzeugen bekannt ist, bereitet im vorliegenden Fall gewisse Schwierigkeiten, da die Gefahr besteht, daß einzelne gegeneinander verstellbare Teile, die nicht in einem Schwingungsknoten liegen, mit der Hochfrequenz aneinander reiben, so daß eine übermäßige Erhitzung auftreten kann. Außerdem muß gewährleistet sein, daß sich trotz der hochfrequenten Schwingung keine Teile lösen. Insofern sind speziell konstruierte Honwerkzeuge vorteilhaft. Ein derartiges Honwerkzeug 100 ist in Figur 8 dargestellt. Dabei ist der Schneidbelag 40, der die Kontur nach Figur 8 hat, auf einem Schaft 101 aufgebracht, der durch ein Aufweitstück 102 elastisch aufweitbar ist. Das ist z.B. dann der Fall, wenn die Ausnehmung 103 im Schaft 101 einerseits und das Aufweitstück 102 andererseits konisch ausgebildet sind, so daß sich bei

axialer Verschiebung des Aufweitstückes eine elastische Aufweitung des Schaftes in radialer Richtung ergibt, der jedoch als Vollkörper ohne Nuten und ohne Schlitze ausgebildet ist, um besondere Stabilität zu gewährleisten. Die erforderlichen elastischen radialen Aufweitungen sind auch auf diese Weise erreichbar. In axialer Richtung im Anschluß an das Aufweitstück 102 befindet sich ein Druckstück 104, das in der Ausnehmung 103 auswechselbar eingesetzt ist. Es liegt mit seinem rechten Ende an der Druckfläche 105 des Aufnahmeteils 106 an, der dann seinerseits mit dem rechten Ende in den Werkzeugaufnahmekegel 8 des Schallübertragungskörpers 9 eingesetzt wird. Man kann also den Schneidmittelbelag 40 dadurch elastisch aufweiten, daß man Druckstücke 104 verschiedener Länge einsetzt. Je länger das Druckstück 104 ist, desto stärker wird der Schaft 101 radial aufgeweitet.

Das Werkzeug 1 führt - vorzugsweise im Resonanzbereich - eine Eigenschwingung aus. Damit ist gemeint, daß das Werkzeug 1 nicht als in sich starres Übertragungselement der hochfrequenten Ultraschall-Schwingung wirkt, sondern vielmehr selbst Medium der Ultraschall-Schwingung, d.h. der durch die Anregung angestoßenen Longitudinal- und Transversalwellen ist. Das bedeutet, wie oben bereits erwähnt, daß das Werkzeug 1 selbst elastische Schwingungen in axialer und radialer Richtung mit der durch die Ultraschall-Schwingung angeregten Eigen-(Resonanz)Frequenz ausführt und dabei seine Kontur periodisch verändert. Um eine günstige Kopplung der

WO 92/07687

16

PCT/EP91/02064

Ultraschall-Energie vom Ultraschall-Schwingungserreger 25 in das Werkzeug 1 zu erreichen, muß der Ultraschall-Schwingungserreger 25 eine Frequenz aufweisen, die möglichst gleich der Eigenresonanz des Werkzeuges 1 ist. Wenn die Eigenresonanz des Werkzeuges zu weit von der des anregenden Systems (Schwingungserreger 25, Schallübertragungskörper 9) abweicht, gerät das Werkzeug nicht in Schwingung. Um die Übertragung der Ultraschall-Energie vom Schwingungserreger 25 auf das Werkzeug 1 optimal zu gestalten, muß ferner der Schallwellenwiderstand des Schwingungserregers möglichst gleich dem des Werkzeuges 1 sein.

Die Eigenfrequenz des Werkzeuges 1 ist durch die Abmessungen (Länge, Durchmesser) den E-Modul des Werkstoffes und die im Werkstoff gegebene Schallgeschwindigkeit bestimmt. Bei Stahl beträgt der E-Modul ca. 21.000 daN/mm² und die Schallgeschwindigkeit 5.960 m/sec. bei 21,7 kHz ergibt dies eine halbe Wellenlänge gleich 187 cm. Dies ist die freie Werkzeuglänge ab Einspannkonus. Wie sich die Eigenschwingung des Werkzeuges 1 geometrisch darstellt, ist in Figur 9 gezeigt. Dabei hat der Durchmesser des Werkzeuges bei (a) seinen größten Wert D_{max} , während die Länge L den Mindestwert L_{min} hat. Bei (b), dem Nulldurchgang der Schwingung in Längsrichtung, ergibt sich der mittlere Durchmesser D_0 und die mittlere Länge L_0 . Bei (c), ergibt sich der Minstdurchmesser D_{min} und die maximale Länge L_{max} . In Figur 9 sind die einzelnen Amplituden den Situationen nach (a), (b) und (c) zugeordnet.

Wie bei (a) in Figur 9 eingezeichnet, ergibt sich in der Tat für jedes Korn des Schneidmittelbelages 40 sowohl eine Bewegungskomponente 32 in axialer Richtung als auch eine Bewegungskomponente 33 in radialer Richtung. Beide Komponenten unterliegen der Eigenfrequenz.

Die Bewegungskomponente 33 in radialer Richtung ist die Ursache dafür, daß während des Umlaufes eines Schleifmittelkorns des Schneidmittelbelages 40 einzelne kleine Taschen in radialer Richtung in die Innenfläche der bearbeiteten Bohrungen eingebracht werden.

Figur 10 zeigt als Fotografie - da nicht anders darstellbar - diese neuartige Oberfläche, wobei, um den Maßstab zu verdeutlichen, eine Strecke, die in der Realität 30 μm entspricht, in der Fotografie eingezeichnet ist. Es zeigt sich nun überraschenderweise, daß entlang der beim klassischen Honen das Kreuzschliffmuster ergebenden zueinander schräggestellten Riefen praktisch durch die überlagerte hochfrequente Schwingung mit radialer und axialer Komponente in kurzen Abständen Mulden oder Taschen entstehen, die während des Umlaufes praktisch "eingehämmert" oder "eingemeißelt" werden, wobei - wie aus dieser Fotografie ohne weiteres erkennbar - zwischen den Mulden gratfreie ebene tragende Bereiche entstehen, die andere Bauteile tragen können. Die Taschen oder Mulden dienen in den Innenflächen der Bohrungen als Ölrreservoir für Schmiermittel. Dies ist insbesondere dann

WO 92/07687

18

PCT/EP91/02064

von größter Bedeutung, wenn ansonsten eine Oberfläche mit extrem guter Qualität erzielt ist. Das Material wird gleichmäßig abgetragen und es entsteht ein entsprechend der Kinematik periodisches Oberflächenmuster. Es ist selbstverständlich stark abhängig von eingestellten Parametern. Bei einer kleinen Drehzahl liegen z.B. die durch die hochfrequente Oszillation erzeugten Schnittspuren sehr dicht beieinander. Bei einer hohen Drehzahl sind diese Schnittspuren entsprechend gestreckt und ergeben einen etwas ungünstigeren Traganteil. Der Traganteil lag bei einer Versuchsserie in ca. $0,2\text{ }\mu\text{m}$ Schnitttiefe bei ca. 30%.

Die neue Oberfläche ergibt eine extreme Verbesserung der Trageigenschaften. Bearbeitet man z.B. eine bestimmte Bohrung in zwei Bearbeitungsstufen mit Körnungen D46 und D15 (nach der FEPA-Definition; vgl. VDI-Richtlinien VDI 3394 vom Juni 1980), so sind bzgl. der Bohrungsgeometrie (Geradheit, Rundheit) Werte unter $0,5\text{ }\mu\text{m}$ erreichbar. Dies erfolgte versuchsweise bei Werkstücken, die auf den Durchmesser von 6,955 bis 6,965 mm konventionell vorgehont waren und in zwei weiteren Bearbeitungsschritten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren fertig bearbeitet wurden. Die Oberflächenrauigkeit lag zu Beginn bei $0,7\text{ }\mu\text{m}$ R_z und konnte mit zunehmender Stückzahl auf unter $0,4\text{ }\mu\text{m}$ R_z verbessert werden. Dabei wurde als Korn Diamant verwendet.

Infrage kommen generell superabrasive Werkstoffe, also neben

Diamant kubisches Bortnitrid (CBN), evtl. bei Bohrungen aus weichem Material (z.B. Alu) auch Rubin, Saphir, Korund.

Von besonderer Bedeutung für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens sind die auftretenden Bearbeitungskräfte. Bei einer Zugabe von 10 μm (Differenz des Durchmessers der unbearbeitenden Bohrung gegenüber dem durch die Bearbeitung angestrebten Endmaß) unter Verwendung des Festdornes mit der Körnung D46 wurde eine Axialkraft von 1,0 N und ein Drehmoment von 1,120 Ncm festgestellt. Ein direkter Vergleich mit einer Bearbeitung, bei der dasselbe Werkzeug ohne Hochfrequenzbeaufschlagung eingesetzt worden wäre, war nicht möglich, da ohne die hochfrequente Oszillation eine Zugabe von mehr als 4 μm nicht zu erreichen ist. Möchte man mehr Material mit einem Hub ohne HF-Oszillation abtragen, so frißt sich das Werkzeug fest. Aber selbst bei einer Zugabe von 4 μm ohne hochfrequente Oszillation, also mit einer um mehr als 50% reduzierten Zugabe, betrug die Axialkraft immer noch 2,4 N und das Drehmoment 1,3 Ncm. Man kann also davon ausgehen, daß mit dem erfindungsgemäßen Verfahren das 2- bis 3-fache der Zugabe in einem Doppelhub abgetragen werden kann, und dabei Axialkraft und Drehmoment noch geringer sind als bei herkömmlichen Verfahren.

Daraus folgt auch, daß mit dem hier beschriebenen Verfahren eine nur sehr geringe Gratbildung verursacht wird. Bei versuchsweise bearbeiteten Werkstücken war, wie aus Figur 10

WO 92/07687

20

PCT/EP91/02064

deutlich zu ersehen, überhaupt keine Gratbildung festzustellen.

Figur 11 zeigt schließlich die Honzugabe dz (in Mikrometer) in Abhängigkeit von der Körnung k (nach der FEPA-Definition) im Vergleich zwischen dem - bekannten - Dornhonen (unterer von einer Körnung D15 bis D181 leicht ansteigender Balken) im Vergleich zu dem Hochfrequenzhonen (schwarz ausgefüllter Bereich). Beim Werkstück handelte es sich um gehärteten Stahl mit einer Härte von mehr als 60 HRC.

Die Schwingungsverhältnisse über der Länge des Werkstückes 1 ergeben sich aus Figur 12 für den Fall, daß die Länge des Werkzeuges 1 gleich der halben Wellenlänge der Ultraschall-Schwingung ist. Generell ist Voraussetzung für das Entstehen einer Eigenschwingung, daß die Länge des Werkzeuges 1 vom Einspannkonus her, der in der "Fesselungsebene" liegt, ein ganz zahlreiches Vielfaches (einschl. des 1-fachen) der halben Wellenlänge ist. In diesem Fall ist links vom Werkzeug die Schwingung in radialer Richtung, die Komponente 33, und rechts die Schwingung in axialer Richtung, die Komponente 32 eingegeben und zur Länge des Werkstückes 1 in Beziehung gesetzt.

Eine besonders vorteilhafte Ausführung der Erfindung ergibt sich aus Figur 13. Diese Darstellung entspricht im wesentlichen Figur 9, jedoch mit dem Unterschied, daß die Form

des Werkzeuges im Ruhezustand (Nulldurchgang (b)) nicht zylindrisch, sondern mit konvexer Kontur versehen ist. Daraus folgt dann, daß sich im Zustand in größter radialer Aufweitung nach (a), d.h. bei D_{\max} und L_{\min} eine zylindrische Form des Werkzeuges ergibt.

Die Zugabe des Durchmessers hängt von der Eingangsamplitude ab. Mit Änderung der Amplitude der Ultraschall-Schwingung, durch die die Eigenschwingung des Werkzeuges 1 angeregt wird, läßt sich also auch die Amplitude der axialen Schwingungskomponente 33 und somit auch D_{\max} einstellen. Durch diese Parameter wird auch die Qualität der bearbeiteten Bohrung direkt beeinflußt. Die Rauhtiefe R_z sinkt in im wesentlichen linearer Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz.

WO 92/07687

2.2

PCT/EP91/02064

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Bearbeiten der Innenflächen von Bohrungen in Werkstücken, bei dem ein mit Schleifmittelbelag belegtes Werkzeug gleichzeitig eine Drehbewegung, eine axiale Hubbewegung und das ferner eine den genannten Bewegungen (2,3) überlagerte Oszillation ausführt, dadurch gekennzeichnet, daß durch Ultraschall eine eigenfrequente Oszillation des Werkzeuges (1) im Bereich von 16-40 kHz angeregt wird und daß die freie Länge des Werkzeuges (1) ab Einspannstelle des Schwingungserregers (25) ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge der eigenfrequenten Oszillation des Werkzeuges ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kontur des Werkzeuges (1) derart bestimmt wird, daß die Form des Werkzeuges (1) bei maximaler Amplitude (D_{max}) der radialen Komponente (33) der Eigenschwingung des Werkzeuges (1) eine zylindrische ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Ultraschallschwingung durch den Schwingungserreger (25) in axialer Richtung der Bohrung auf das Werkzeug (1) einwirkt.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Bearbeitung in nur einem

Doppelhub erfolgt und daß das Honwerkzeug in an sich bekannter Weise eine konische Schneidzone (6) aufweist, deren in Richtung der axialen Hubbewegung (3) hinterer größerer Durchmesser (D_1) gegenüber dem Durchmesser der unbearbeiteten Bohrung ein Übermaß von mehr als 4 μ m aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die anregende Ultraschallschwingung eine Frequenz von 20 bis 24 KHz hat.
6. Verfahren nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz der anregenden Ultraschallschwingung im wesentlichen gleich der Eigenfrequenz des Werkzeugs (1) ist.
7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß dem verwendeten Kühlmittel ein abrasives Mittel (Läppmittel) in Suspension zugesetzt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzielung eines Ausfeuerteffektes die Drehgeschwindigkeit des Honwerkzeuges, der Vorschub des Honwerkzeuges in axialer Richtung (Hubgeschwindigkeit), sowie Amplitude und Frequenz der Ultraschallschwingung des Honwerkzeuges derart bestimmt sind, daß die von den Schleifmittelkörnern

WO 92/07687

24

PCT/EP91/02064

bei einem Ultraschallhub überstrichenen Flächen beim jeweils folgenden entgegengesetzten Ultraschallhub zu einem Teil erneut überstrichen werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, gekennzeichnet durch die Verwendung superabrasiven Korns.
10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß das Honwerkzeug (1,100) im unteren Ende (8) eines Schallübertragungskörpers (9) aufgenommen ist, auf den von oben ein Ultraschallschwingungserreger (25) einwirkt, und daß der Schallübertragungskörper in einem Gehäuse (12) zumindest in einer Ebene, die im Knotenbereich der Ultraschallschwingung liegt, durch Fesselungsmittel (10',11') derart aufgehängt ist, daß er (9) die Ultraschallschwingung relativ zum Gehäuse (12) ausführen kann, während das Gehäuse die Schwingung nicht mit ausführt, daß das Gehäuse (12) drehangetrieben wird (20,21), und daß die durch Gehäuse (12), Schallübertragungskörper (9), Honwerkzeug (1,100) und Drehantrieb (20,21) gebildete Einheit zur Erzeugung der axialen Hubbewegung in an sich bekannter Weise höhenverstellbar ist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Zuleitung elektrischer Energie zum

Ultraschallschwingungserreger (25) über Schleifringe (35,36) erfolgt.

12. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Ultraschallschwingungserreger (25) durch Schwingquarze (26,27) gebildet wird, die durch eine Spannschraube (29) auf das obere Ende des Schallübertragungskörpers (9) aufgespannt sind.

13. Honwerkzeug zur Verwendung in einem Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schneidbelag (40) auf einem Schaft (101) aufgebracht ist, daß der Schaft durch ein Aufweitstück (102) elastisch aufweitbar ist, das in einer Ausnehmung (103) im Schaft (101) einsetzbar ist, daß ferner in der Ausnehmung (103) ein auswechselbares Druckstück (104) aufgenommen ist, und daß der Schaft mit einem Aufnahmeteil (106) derart verschraubt ist, daß eine Druckfläche (105) des Aufnahmeteils das Druckstück und das Aufweitstück an die Innenfläche des Schaftes in einer Lage fest andrückt, die in Abhängigkeit von der Länge des Druckstückes die gewünschte Aufweitung des Schaftes ergibt.

14. Honwerkzeug nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Verschraubung des Aufnahmeteils mit dem Schaft im Bereich eines Schwingungsknotens erfolgt.

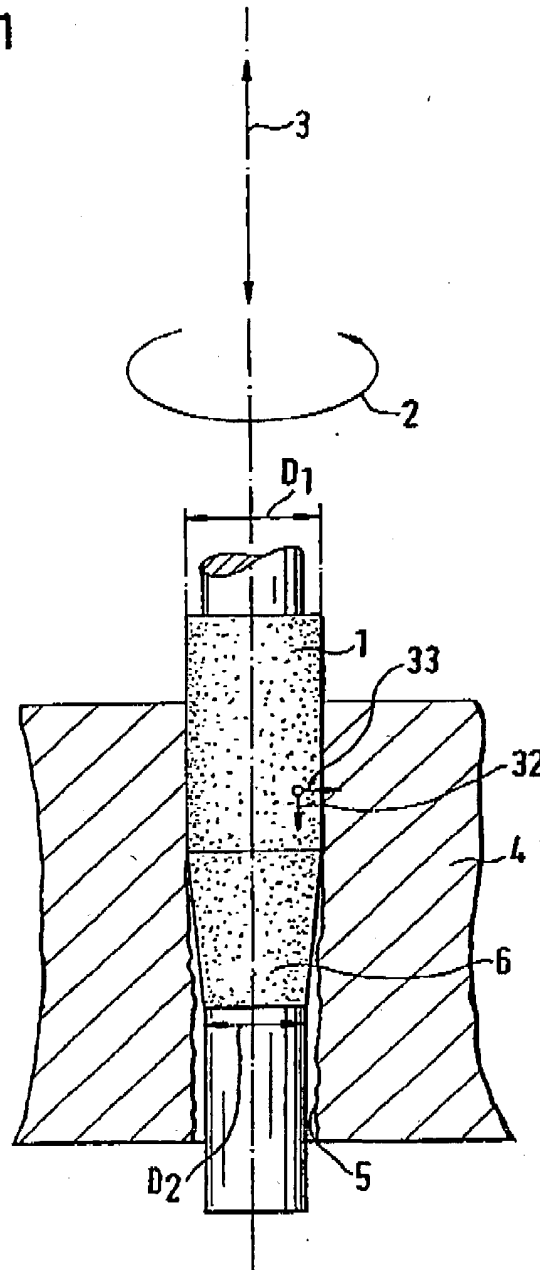
15. Honwerkzeug nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Schaft ein ungeschlitzter Vollkörper ist.

WO 92/07687

PCT/EP91/02064

1/9

Fig. 1



2 / 9

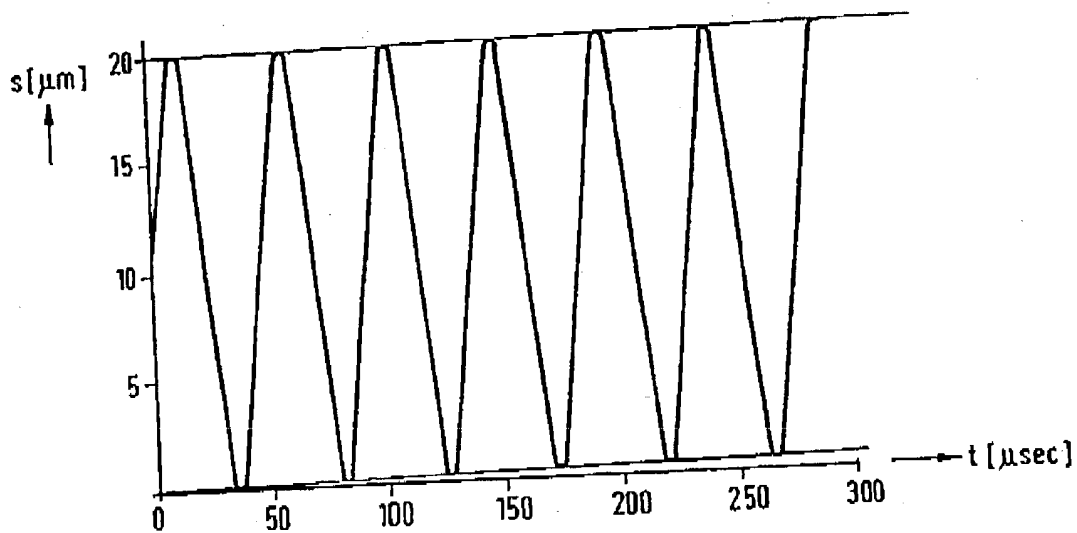
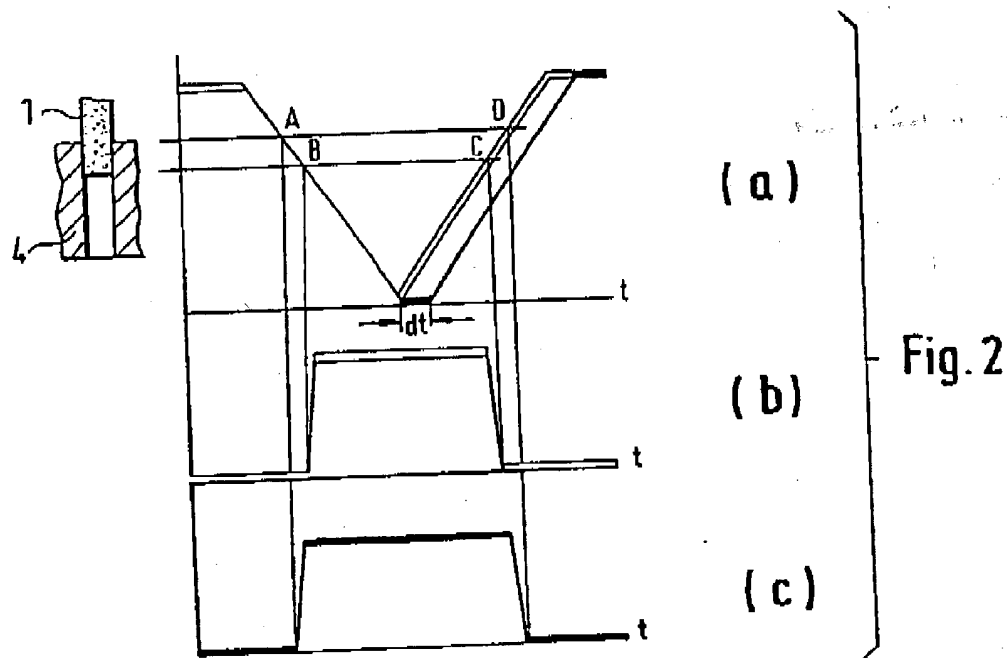


Fig. 3

WO 92/07687

PCT/EP91/02064

3/9

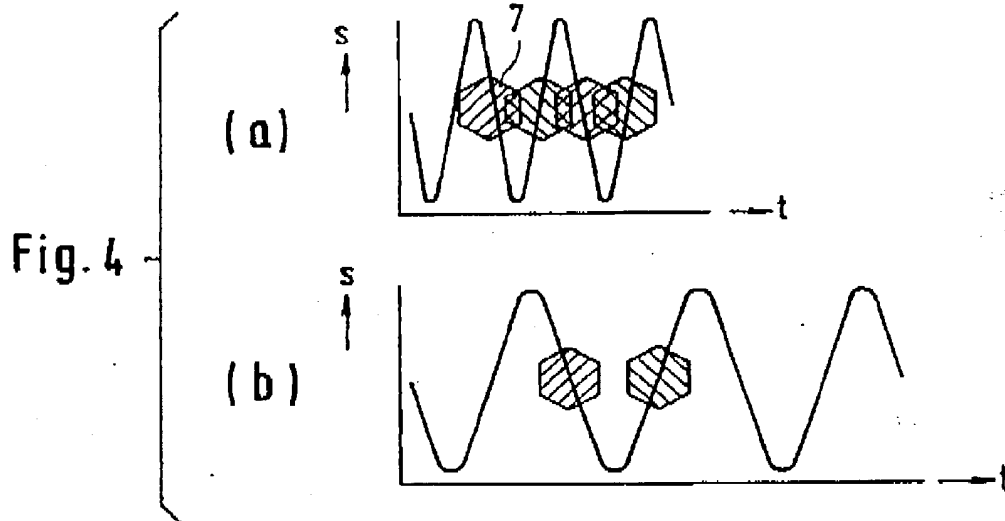
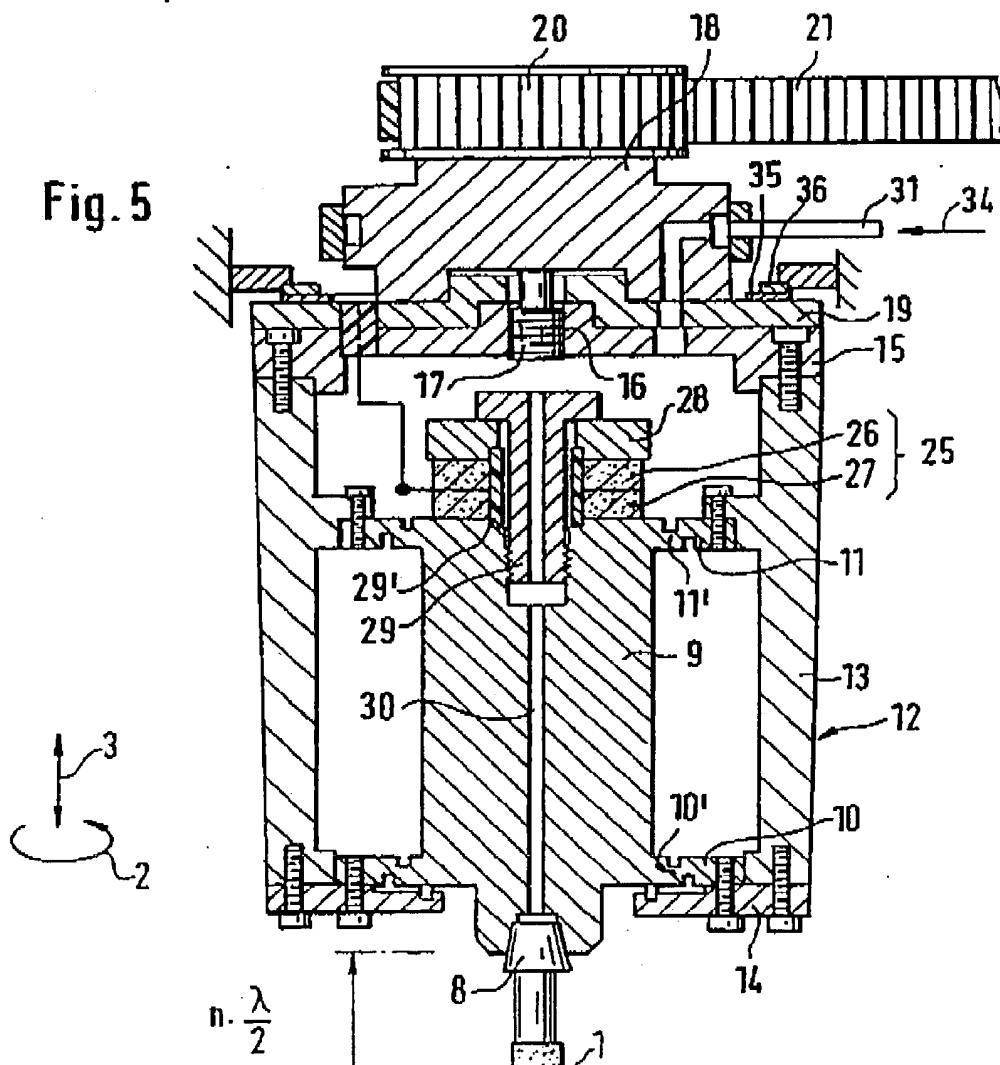


Fig. 5



4 / 9

Fig. 6

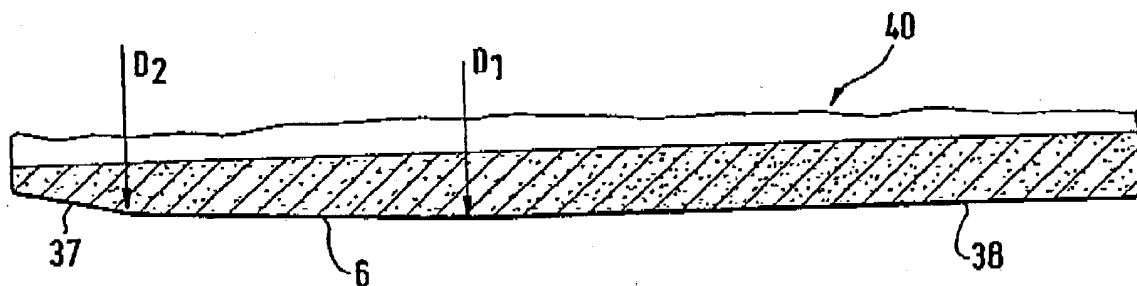
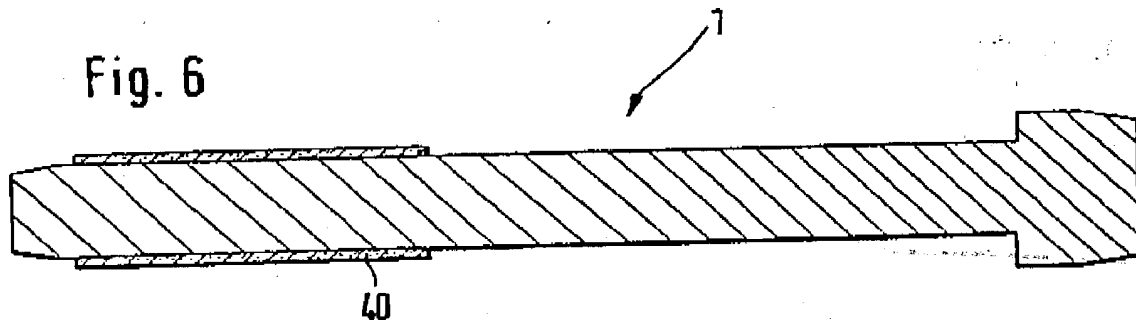
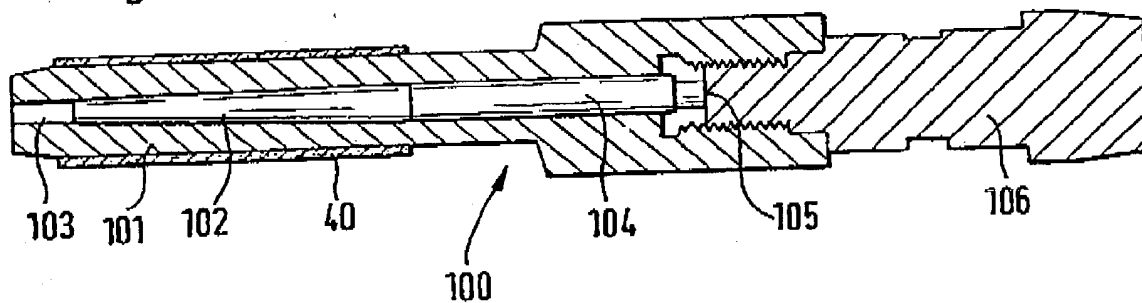


Fig. 7

Fig. 8



WO 92/07687

PCT/EP91/02064

5 / 9

Fig. 9a

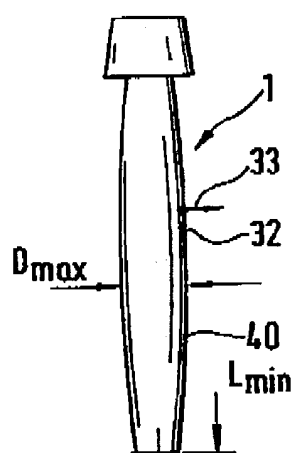


Fig. 9b

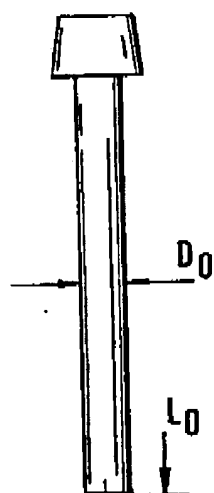


Fig. 9c

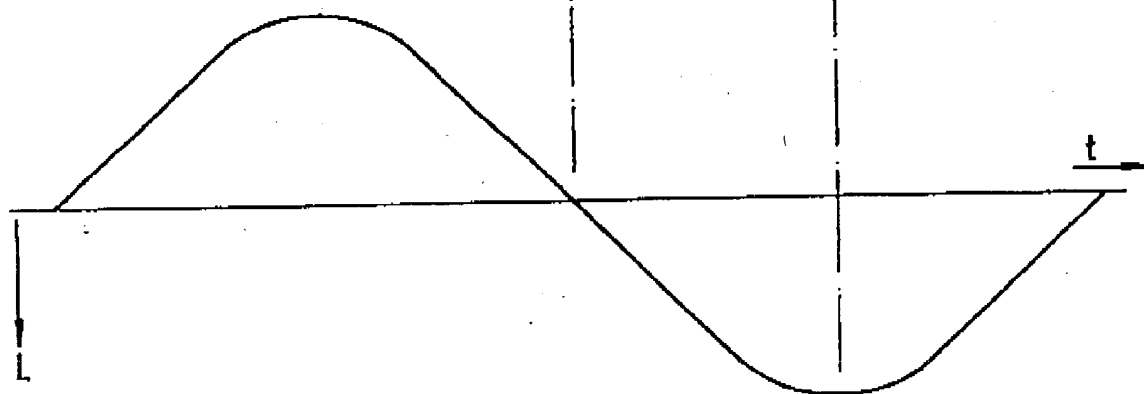
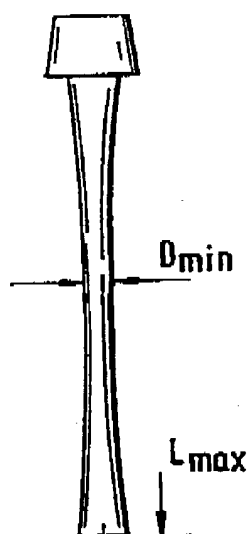
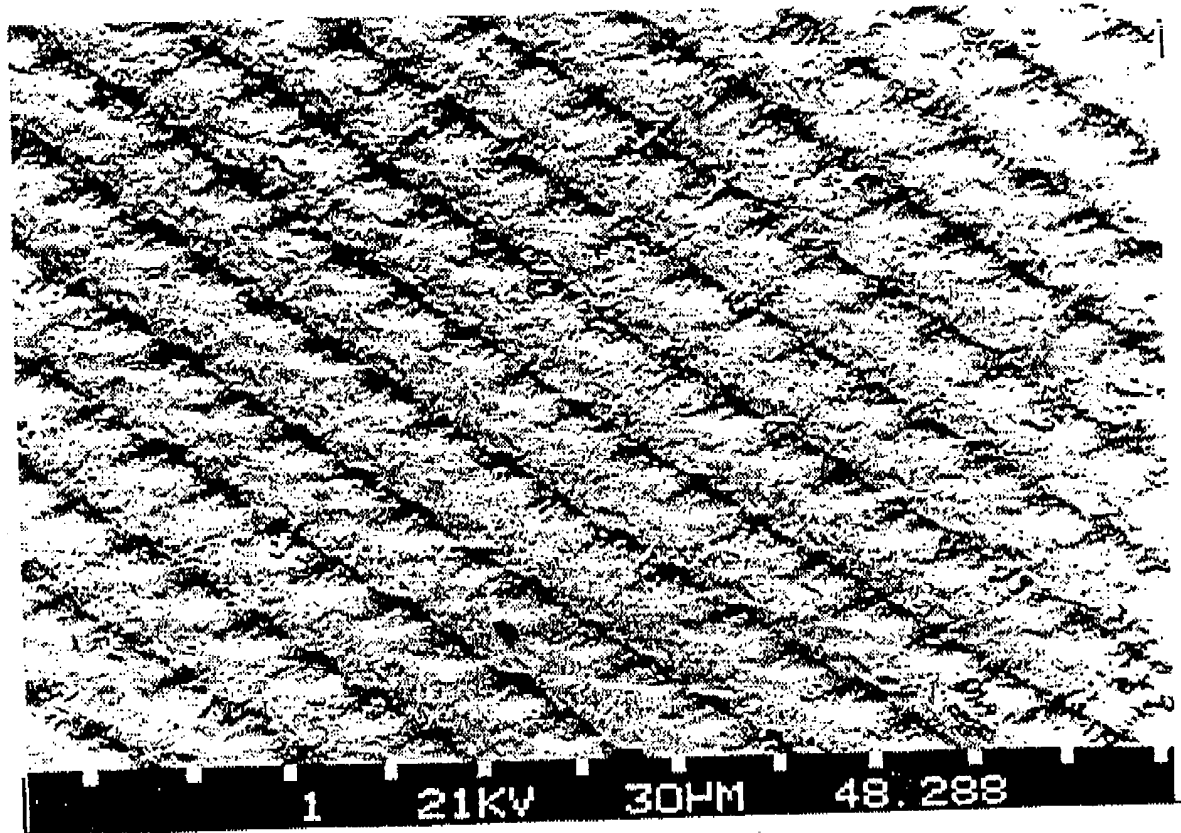


Fig. 9d

WO 92/07687

6/9

Fig. 10



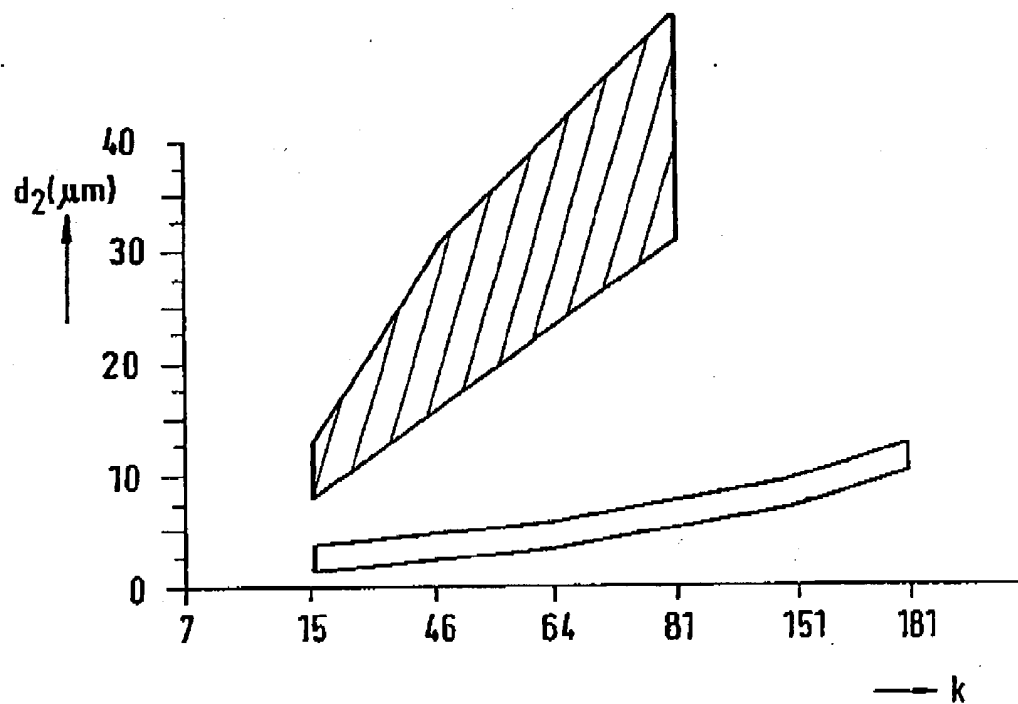
ERSATZBLATT

WO 92/07687

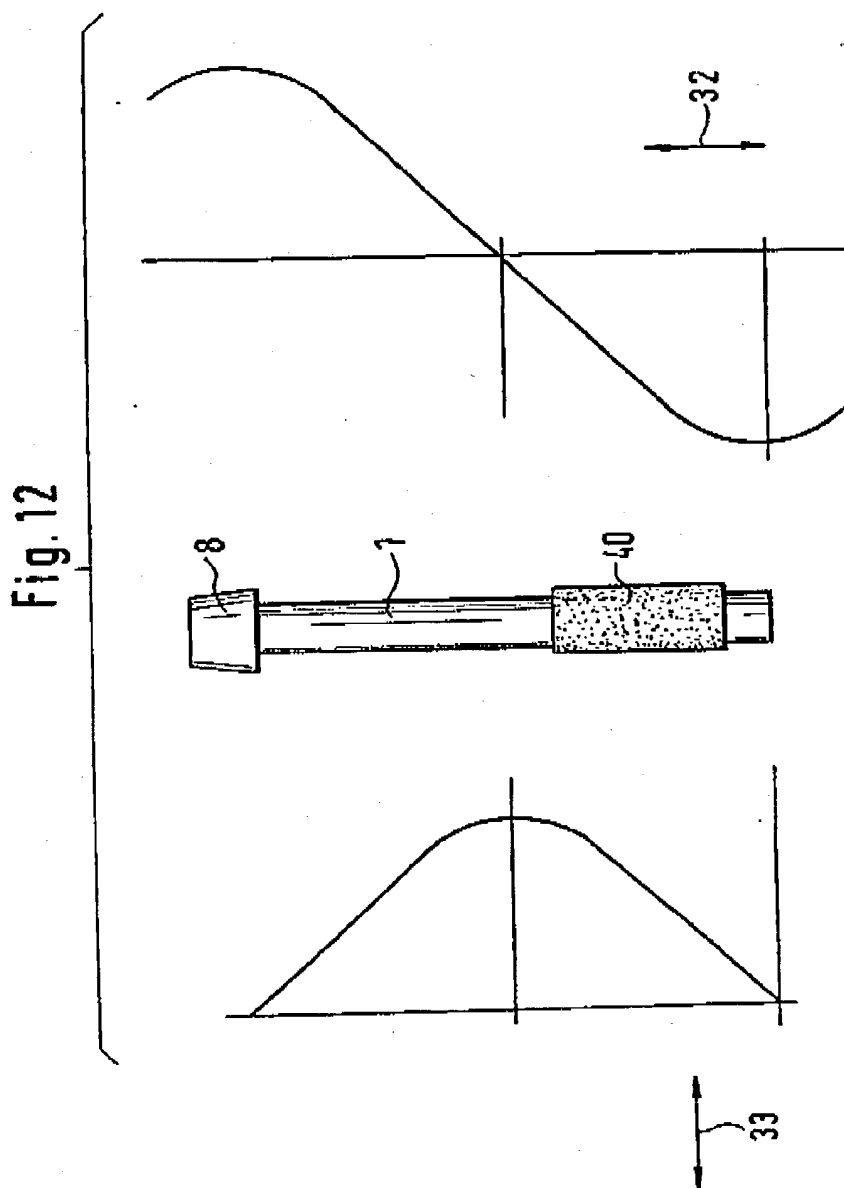
PCT/EP91/02064

7/9

Fig. 11



8/9



WO 92/07687

PCT/EP91/02064

9/9

